

5 自由度混联机器人设计与运动学分析

姚璐¹, 谢聪琳², 史春海³

(1. 西格斯(天津)科技发展有限公司, 天津 300110; 2. 合美智汇(天津)科创有限公司, 天津 300110;
3. 瑞联智控(天津)科技有限公司, 天津 300110)

摘要: 针对现有并联机器人不能满足航空航天制孔稳定性问题,设计一种新型 5 自由度混联机器人(5-DOF)。该机器人集成并联机构与现有回转头的优势,由三条特殊用途单元(special purpose unit, SPU)支链和一条从动单元(passive unit, PU)支链构成,具有独特的机构布局和稳固的结构支撑。验证了该机器人在运动性能方面的优越性,解决了航空航天制孔的稳定性问题,其在高端制造领域如航天航空的应用前景广阔。

关键词: 5-DOF; 混联机器人; 设计; 运动学分析

中图分类号: F832.6; F752.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)08-0086-05

随着科学技术的不断进步,制造业迎来前所未有的发展机遇,同时也面临更加严苛的生产要求,特别是在航空航天、汽车制造等高精度、大规模生产领域,对自动化制孔技术的需求日益增强。传统的单一串联或并联机器人已难以满足这些领域对加工精度、效率和灵活性的高要求。因此,混联机器人的出现成为解决这一问题的关键。通过结合串联机器人的灵活性和并联机器人的高精度,混联机器人在设计与运动研究方面展现出了巨大的潜力和应用价值。近年来,国外学术界对混联机器人(hybrid robot)的设计优势进行全面而深入的探讨,这一领域的研究不仅丰富了机器人学的理论体系,也为高精度制造领域带来革命性的技术突破。薛雷等^[1]指出,混联机器人巧妙地融合串联机器人的灵活操作性和并联机器人的高刚度结构,这种独特的结合方式使其在精密加工、航空航天等高精度制造领域展现出卓越的性能,成为行业内的优选方案。张美玲等^[2]利用先进的矩阵变换方法,对混联机器人的正逆运动学方程进行详尽的推导,这不仅为混联机器人的运动控制提供坚实的理论基础,也为后续的研究工作奠定重要的数学基础。原辉^[3]巧妙地借助 MATLAB 和 ADAMS 等仿真软件,对一款 5 自由度混联机器人进行深入的运动学仿真分析,通过与实际测试数据的对比,验证所建模型的准确性和可靠性,进一步证明混联机器人在复杂运动控制方面的优越性。董成林等^[4]以一款专门用于

飞机部件加工的混联机器人为研究对象,通过优化设计和控制算法,提升了加工效率和精度。以上这些研究不仅揭示了混联机器人在高精度制造领域的巨大潜力,也为相关领域的技术进步和产业升级提供宝贵的参考和借鉴。研究表明,通过优化混联机器人的设计和控制算法,可以显著提升加工效率和精度,为相关领域的发展提供有力支持。本文探究一个新的两转一移 3SPU-PU 并联机构,契合航空工业制孔工艺的高稳定性与精度要求,期望进一步优化制孔工艺。

1 机构描述

1.1 机构介绍

在大型航天器舱体原位制造中,需要高精度机器人应用于设备安装支架端面的铣削制孔作业。但现有并联机器人不能满足航空航天制孔稳定性要求。本文构造集成了并联机构与现有 2R 回转头的优势,其机构布局的简化图示和三维模型如图 1 和图 2 所示。

1.2 自由度计算

乔志鹏等^[5]的研究表明,在分析混联机构时,将其分开为并联、串联 2 个转头系统,分别计算自由度,最后将结果相加。经此步骤,串联转头的自由度被明确界定为 2。为了确定 2R1T 并联机构的自由度数量,采用经过修正的 G-K 公式进行计算,该公式具体表述为

收稿日期: 2024-12-23

作者简介: 姚璐(1989—),女,天津人,硕士,高级工程师,研究方向为工业机器人、人工智能;谢聪琳(1988—),女,江西赣州人,工程师,研究方向为工业机器人、人工智能;通信作者史春海(1990—),男,山东临沂人,高级工程师,研究方向为工业机器人、人工智能。

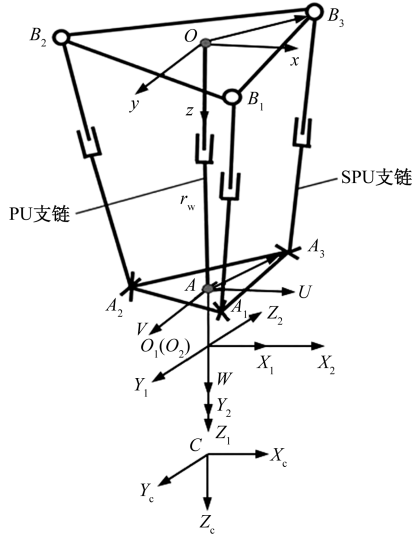


图1 5-DOF 混联机器人机构简图

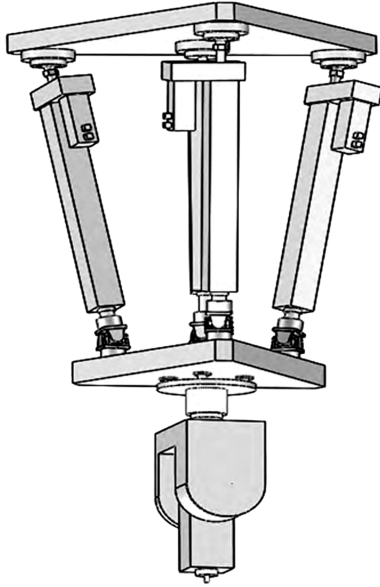


图2 5-DOF 混联机器人三维模型

$$M = \lambda(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + V \quad (1)$$

式中: λ 为阶; n 为活动构件; g 为运动副数目; f_i 为第*i*个运动副自由度个数; V 为过约束个数。

结合式(1)可得自由度计算公式为

$$M = 6 \times (8 - 9 - 1) + 17 = 3 \quad (2)$$

由此可以得出,该混联机器人的自由度为5。

2 运动学分析

当前,陈青青^[6]针对混联机器人所开展的运动学分析探究尚显匮乏。赵岚等^[7]认为相较于单纯的并联或串联机器人,混联机器人的运动学分析无疑更为错综复杂。鉴于此,创新性地采纳子结构综合

的思维方式,首先对串联与并联部分各自进行深入的运动学剖析。随后,借助坐标变换的巧妙手段,成功地将这两部分子结构的运动学特性紧密地联结在一起。在此基础上,推导出混联机器人的完整运动学方程,并采取有效措施对方程进行严谨的验证,以确保其准确性和可靠性。

2.1 并联机构运动学

于静态平台之上,构建一个稳定的坐标系 $Oxyz$,同时,在动平台上,设立一个参考用的坐标系 $Auvw$ 。 $Auvw$ 坐标系相对于 $Oxyz$ 坐标系的变换,可以通过一系列的转换操作来实现:首先绕 x 轴进行 ϑ 角度的旋转,随后绕 y 轴旋转 β 角度,最后沿着 z 轴方向进行 z 个单位长度的平移。这一系列变换过程,可以通过一个特定的矩阵来精确地表达。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{P} = \begin{bmatrix} c\beta & s\beta s\theta & s\beta c\theta & 0 \\ 0 & \theta & -s\beta & 0 \\ -s\beta & c\beta s\theta & c\beta c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} c\beta & s\beta s\theta & s\beta c\theta \\ 0 & \theta & -s\beta \\ -s\beta & c\beta s\theta & c\beta c\theta \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过分析可以得到 B_1, B_2, B_3 在 $Oxyz$ 下的位置矢量,同时也可以确定 A_1, A_2, A_3 在 $Auvw$ 下的位置矢量。进一步可得 A_1, A_2, A_3 坐标系为

$$\mathbf{A}_i^0 = \mathbf{R}\mathbf{A}_i + \mathbf{P}, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

给 P_1 位置矢量 $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$, 构造方程如下

$$\mathbf{r} = \mathbf{b}_i + q_i \mathbf{w}_i - \mathbf{a}_i, i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$\mathbf{r} = q_4 \mathbf{w} \quad (7)$$

对 \mathbf{r} 取模,得 SPU 和 PU 支链杆长、方向矢量为

$$q_4 = |\mathbf{r}|, \mathbf{w} = \frac{\mathbf{r}}{q_4} \quad (8)$$

同时时间求导:

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{q}_i \mathbf{w}_i + q_i \dot{\mathbf{w}}_i \times \mathbf{w}_i - \mathbf{w} \times \mathbf{a}_i, i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{q}_4 \mathbf{w} + q_4 \dot{\mathbf{w}} \times \mathbf{w} \quad (10)$$

式中: $\dot{\mathbf{r}}$ 和 \mathbf{w} 是点A的速度和PU分支的角速度; $\dot{\mathbf{w}}$ 是SPU分支的角速度。

将数学表达式(9)与向量 \mathbf{w}_i 执行点积操作,同时将式(10)分别与向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 进行点积计算。完成这些运算后,将得到的各项结果进行综合,从而构建一个新的矩阵形式的表达式。

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{p}} \quad (11)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_a \\ J_c \end{bmatrix}, \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{w} \end{bmatrix}, \dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: J 为 6×6 矩阵; J_a 为驱动雅可比矩阵; J_c 为约束雅可比矩阵。

2.2 2-DOF 转头运动学

采用 D-H 参数法, 分别构建包含两个自由度的摆头运动坐标系及刀具定位坐标系。具体而言, 将 C 轴所在坐标系命名为 $O_1-X_1Y_1Z_1$, A 轴所在坐标系定义为 $O_2-X_2Y_2Z_2$, 并明确刀具相对于机床的坐标系 $C-X_cY_cZ_c$, 为后续的运动学分析与计算提供基础框架。依据此方法, 获得详细的 D-H 参数, 如表 1 所示。

表 1 D-H 参数

坐标系	连杆 i	变量 θ_i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i
0	2	θ_1	0	0	d_1
2	3	θ_2	-80	0	0
3	4	θ_3	-80	0	d_2

为了详尽且精确地表达这两个组件间的空间方位关系, 采纳连杆变换矩阵工具, 对其相对方向性进行准确且清晰的阐述。其表达式为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & -d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用 3T 来描述基坐标系与连杆末端坐标系的坐标变换, 写成矩阵形式为

$${}^3T = {}^1_0T_0 {}^2_0T_0 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用微分-矢量求解二自由度串联转头的雅可比矩阵, 可得

$$J_1 = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (15)$$

由此得 2-DOF 运动雅可比矩阵 J_2 为

$$J_2 = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.3 混联机器人位置反解分析

由以上所有分析知, 混联机器人坐标变换矩阵为

$${}^0T = {}^0_A T {}^A_C T = R^3 T \quad (17)$$

刀具方向向量 w_c 与 z 轴重合, 有

$$w_c = R^3 R_z \quad (18)$$

在混联机器人的逆向求解过程中, 核心任务是: 在已知刀具末端在固定坐标系中的坐标位置及其方向向量 w_c 。一旦末端执行器的位置被确切给定, 即可通过相应的数学方法推导出转角的数值。

3 运动学仿真验证

3.1 位置反解仿真验证

接着需要验证以上设计的机器人运动学逆解模型的精确性, 设定具体的参数进行验证。其中, 动平台的半径被设定为 $r=250$ mm, 而静平台的半径则为 $R=600$ mm。随后度刀具提前设定一个空间坐标运行轨迹。通过这些翔实的参数设定, 能够全面且准确地评估逆解模型在实际应用中的表现。这一验证过程不仅是对模型理论的实践检验, 更是确保混联机器人在后续工作中能够稳定、高效运行的重要步骤。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi}{5} t \\ \beta = \frac{\pi}{12} \sin \frac{\pi}{5} t \\ z = 800 + \sin \frac{\pi}{5} t \end{cases} \quad (19)$$

在此基础上, 进一步计算混联机器人在运行过程中, 其杆长以及转头转角的理论期望值。这些杆长的动态变化特性被直观地展示在图 3 中, 通过图 3, 可以清晰地观察到杆长随着机器人运动而发生的具体变化趋势。

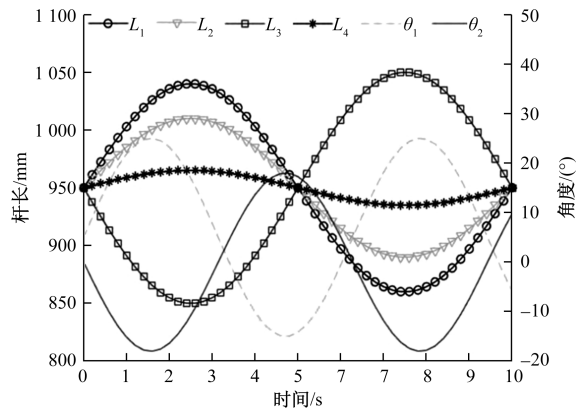


图 3 理论计算杆长和角度曲线

在此过程中, 还采取另一种验证手段, 即将采用 Parasolid x_t 格式构建的三维混联机器人模型, 导入至 ADAMS 这一专业的仿真分析平台之中, 以便对其逆运动学特性进行深入验证。在 ADAMS 环境中, 设置仿真所需的一系列基本参数, 这涵盖

必要的约束条件以及驱动设置,确保仿真环境与理论计算所依据的条件保持高度一致。随后,成功输出杆长以及角度的仿真数值,并将这些关键数据以图表形式清晰地呈现在图4中。

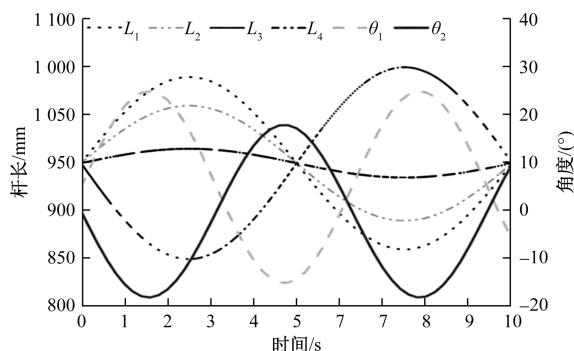


图4 仿真分析杆长和角度曲线

通过对图3中理论计算所得数据与图4中仿真分析所得结果的细致比对,可以清晰地观察到,两者所呈现的杆长及角度变化曲线在整体趋势上呈现高度的一致性。这一发现不仅有力地验证在理论计算阶段所构建的混联机器人逆运动学模型的准确性,还进一步确认该模型在实际应用中的可行性。因此,可以确认,所建立的理论模型是正确的,能够为混联机器人的后续设计、优化及实际控制提供坚实的理论基础和有力的技术支持。

3.2 速度与角速度仿真验证

基于上述详细给出的刀具末端在空间中的坐标运动轨迹,以及其方向向量 w_c 相对于固定坐标系所呈现的姿态角 α 和 β 的具体数值,分别将这些关键参数输入至MATLAB与ADAMS工具中,以开展深入的理论计算与运动学仿真分析。通过这一系列的计算与仿真过程,成功地获取混联机器人在运行过程中的速度与角速度的理论值以及仿真值,并分别将这些数据以直观的图表形式展示在图5和图6中。

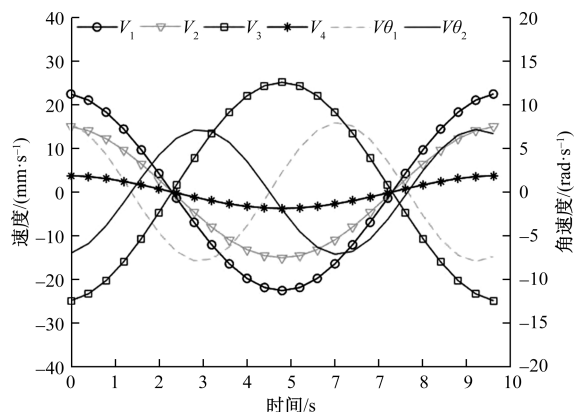


图5 理论计算速度和角速度输出曲线

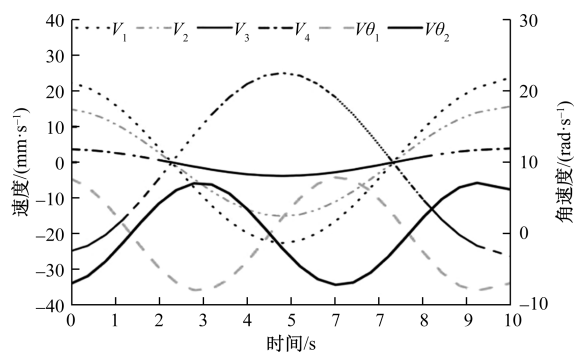


图6 仿真分析速度和角速度输出曲线

在对比混联机器人动态性能的理论计算与仿真分析结果时,聚焦于图5和图6所展示的速度与角速度输出曲线。图5作为理论计算的直接产物,提供了混联机器人在理想状态下的速度与角速度输出曲线。这些曲线基于精确的数学模型和参数,描绘了一个理想的、无干扰的运动状态。图6则是通过ADAMS工具进行仿真分析后得到的实际模拟曲线。与图5相比,尽管在某些细节上存在差异,但整体上,图6所展示的速度与角速度变化趋势与图5高度一致。这一结果不仅验证了理论计算模型的准确性,还表明仿真分析能够有效地模拟出混联机器人在实际运行中的动态性能。

4 混联机器人有限元分析

在细致剖析混联机器人的运动性能时,依据刀具末端在三维空间中的精确坐标移动路径,以及方向向量 w_c 相对于固定坐标系所展现的姿态角 α 与 β 的数值,将这些至关重要的参数逐一输入至MATLAB与ADAMS两大工具中进行详尽的理论推演与运动学仿真验证。此过程不仅精确地计算出混联机器人在运作流程中的速度与角速度的理论参照值,同时也通过仿真分析技术得出相应的模拟值。从所得数据中,可以观察到理论计算所得的速度与角速度曲线与仿真分析所得的曲线在整体趋势上呈现高度的一致性。无论是理论计算还是仿真分析,速度和角速度均呈现相似的变化趋势。这些数据不仅提供混联机器人动态性能的直观视图,更为后续的性能评估与优化设计奠定坚实的数据基础。

所设计的混联机器人,专门用于处理2.5 mm和4 mm的孔,对其强度和刚度的测试显得尤为重要。在末端施加2 000 N的力进行测试。结合表2的材料性能参数来看,45钢和Q235钢的弹性模量相近,具有较高的刚度,但45钢的屈服强度稍高,表明其能承受更大的塑性变形而不被破坏。7075-T6

铝合金虽然弹性模量较低,但其屈服强度远高于 45 钢和 Q235 钢,且密度较小,有助于减轻机器人整体重量。综合考虑材料的性能参数和机器人的设计需求,选择合适的材料对于提升机器人的性能至关重要。

表 2 材料性能参数

材料名称	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	泊松比
45 钢	210	7 880	310	0.29
7075-T6	73	2 820	510	0.35
Q235	200	7 870	240	0.35

5 结论

(1)针对航空航天制孔稳定性问题,设计了一种集成并联机构与现有回转头优势的新型 5 自由度混联机器人(5-DOF)。该机器人由三条特殊用途单元(SPU)支链和一条从动单元(PU)支链构成,具备独特的机构布局和稳固的结构支撑。

(2)通过对并联机构和 5-DOF 转头的运动学分析,以及混联机器人的位置反解分析,证明了该机器人在运动性能方面具有优越性。这种分析确保机器人在执行复杂任务时的准确性和灵活性。

(3)进行运动学仿真实验,进一步确认机器人在位置和速度方面的性能。仿真结果支持了理论分析的结论,展示了机器人在实际操作中的稳定性和高效性。

(4)在强度与刚度测试中,该机器人在末端施

加特定力时表现良好的承载能力和结构稳定性。这证明机器人在面对高负荷工作环境时的可靠性和耐久性。

(5)研究通过创新设计解决了航空航天制孔的稳定性问题,实现了高精度与灵活性。其在高端制造领域如航天航空的应用前景广阔,并为开发高效、耐用的机器人提供支持,推动智能制造的发展,有助于提升高端装备的制造水平。

参考文献

- [1] 薛雷,邓江沁,李子清. 面向复杂狭窄结构检测清除的超冗余度机器人研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 12786-12795.
- [2] 张展魁,岳义,韦宝琛. 基于 2UPU-2SPR 的新型五自由度混联机器人[J]. 机械工程, 2024, 7(3): 78-89.
- [3] 原辉. M701F4 燃气轮机进气罩壳滤网冲洗机器人系统研究与应用——以京燃热电厂为例[J]. 科技和产业, 2024, 45(7): 122-127.
- [4] 董成林,黄田,刘海涛,等. 一种新型五自由度混联机器人的参数化建模与集成设计方法研究[J]. 金属加工, 2023(9): 95-99.
- [5] 乔志鹏,白峭峰,赵春. 基于双目视觉距离误差测量的工业机器人运动学标定方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024(5): 32-37.
- [6] 陈东青. 基于 ABB 机器人的柔性分拣系统设计[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 101-106.
- [7] 赵岚,唐国,寅温. 基于 3D 视觉的机器人分拣实验系统研究与设计[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2023, 15(5): 604-611.

Design and Kinematic Analysis of 5-degree-of-freedom Hybrid Robot

SHI Chunhai¹, YAO Lu², XIE Conglin³

(1. Sigma(Tianjin) Technology Development Co. Ltd., Tianjin 300110, China;

2. Hemei Zhihui(Tianjin) Science and Technology Innovation Co. Ltd., Tianjin 300110, China;

3. Ruilian Intelligent Control(Tianjin) Technology Co. Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: A new type of five degree of freedom hybrid robot(5-DOF) was designed to address the stability issue of aerospace drilling that could not be met by existing parallel robots. The robot integrates the advantages of parallel mechanisms and existing rotary heads, consisting of three Special Purpose Unit(SPU) branches and one Passive Unit(PU) branch, with a unique mechanism layout and stable structural support. Through kinematic analysis of the parallel mechanism and 5-DOF(5-Degrees of Freedom) rotor, as well as position inverse analysis of the hybrid robot, the superiority of the robot in terms of motion performance is verified, providing useful reference for improving robot performance.

Keywords: 5-DOF; hybrid robot; design; kinematic analysis